

十字交叉型接头双光束光纤激光焊接特性

马国龙, 李俐群*, 陈彦宾, 赵 恒

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 采用双光束光纤激光焊接方法对特殊的十字交叉型接头进行焊接研究,从焊缝成形、力学性能和微观组织方面,系统研究了光斑排布方式和热输入对双光束激光焊接十字交叉型接头焊接特性的影响规律。试验结果表明,采用双光束激光焊接方法可成功实现十字交叉型接头的连接,获得成形良好、力学性能满足要求的接头。在热输入大于 120 kJ/m 时可实现接合面的完全熔合,且串行排布时焊缝成形明显优于并行排布。接头抗拉强度随热输入的增大而增大;在热输入相同条件下,串行排布接头抗拉强度明显大于并行排布,在热输入约为 140 kJ/m 时接头强度达到母材的 96.5%。焊缝重熔区显微硬度高于未重熔区,这归因于重熔后焊缝中存在更多的针状 δ 铁素体。

关键词 激光技术; 激光加工; 十字交叉型接头; 双光束; 激光焊接; 焊接特性

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0302002

Dual Beam Fiber Laser Welding Characteristics of Cross-Type Joint

Ma Guolong, Li Liqun, Chen Yanbin, Zhao Heng

*State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China*

Abstract Study of welding the special cross-type joint is carried out by dual beam fiber laser welding technique. The effects of beam configuration and heat input on the dual beam laser welding characteristics of cross-type joint are systematically studied from weld formation, mechanical property and microstructure. The results show that the cross-type joint can be successfully fabricated by dual beam laser welding method, and the joint with good weld formation and satisfied mechanical property can be obtained. The joining zone is completely fused when the heat input exceeds 120 kJ/m. The weld formation of tandem dual beam laser welding is superior to that of side-by-side dual beam laser welding. The tensile strength of joint increases with the increasing of heat input. With the same heat input, the tensile strength of tandem beam configuration is bigger than that of side-by-side beam configuration. The tensile strength reaches 96.5% of the base metal with heat input about 140 kJ/m. The microhardness of remelting zone is higher than that of non-remelting zone, which is attributed to the reason that more acicular δ ferrites are generated in weld fusion line after remelting.

Key words laser technique; laser processing; cross-type joint; dual beam; laser welding; welding characteristic

OCIS codes 160.3900; 140.3390; 350.3850

1 引 言

激光焊接技术具有焊接效率高、焊接变形小等优点,因此被广泛应用于汽车、航空航天等众多领域^[1],如激光拼焊对接接头^[2]、镀锌钢板搭接接头^[3]以及大型客机机身壁板 T 型接头^[4]等常见接头形式均采用激光焊接技术进行连接。

收稿日期: 2016-09-27; **收到修改稿日期:** 2016-11-03

作者简介: 马国龙(1987—),男,博士研究生,主要从事双光束激光焊接方面的研究。E-mail: guolongma@163.com

导师简介: 陈彦宾(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工等方面的研究。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: liliqun@hit.edu.cn

为满足某些特定场合的使用要求,可能会对结构件的接头形式进行特别设计,而这些接头通常会与常规接头形式不同,如在网格状构件中会存在十字交叉型接头等特殊的接头形式。然而,由于传统的单光束激光光斑尺寸小、加热面积小且温度场难以控制,因此难以满足这些特殊接头的焊接需求。此外,由于单光束激光深熔焊过程不稳定,还可能会造成焊缝成形差以及气孔、裂纹等缺陷。研究表明,采用双光束激光焊接技术可以显著改善焊缝质量^[5-7]和提高焊接适应性^[8-9]。此外,由于双光束焊接过程中包含两束激光,因此可以根据接头的结构特点,通过调节两束激光的排布方式、光斑间距和能量比等工艺参数对焊接过程中的加热面积以及温度场进行灵活控制,以实现对接头的焊接。但是,目前对双光束激光焊接的研究仍然局限于常规接头形式^[10-11],而对于特殊接头的研究未见报道。

本文采用双光束光纤激光焊接技术对网格状构件中存在的十字交叉型接头的焊接特性进行了研究,从焊缝成形、力学性能以及微观组织方面对其焊接特性进行了系统分析,为特殊接头的双光束激光焊接提供试验基础。

2 试验材料及方法

试验采用 321 不锈钢板作为组装十字交叉型接头的材料,其规格为 150 mm×120 mm×1.7 mm,其化学成分如表 1 所示。图 1 所示为十字交叉型接头的组装示意图。首先在短边的中间位置加工出与板厚相等的开口,然后两板沿开口位置插接即获得十字交叉型接头。组装前,使用丙酮清洗试件表面以及开口内侧,去除加工过程中的油污等杂质。组装后采用点焊的方式固定上下端插接处。

表 1 321 不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 321 stainless steel (mass fraction, %)

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Ti	Fe
0.045	1.08	0.47	17.02	9.02	0.034	0.0065	0.22	Bal

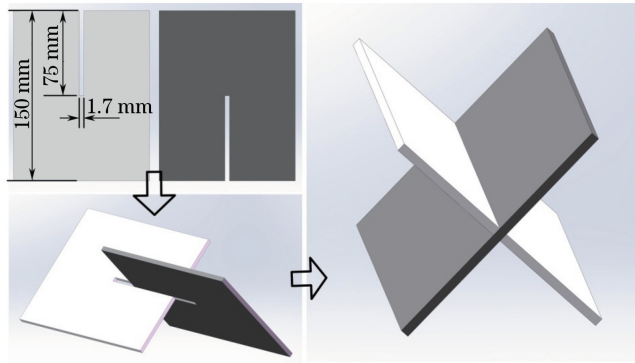


图 1 十字交叉型接头组装过程示意图

Fig. 1 Schematic of assembly process of cross-type joint

焊接设备采用 IPG 光纤激光器(型号为 YLS-5000),其主要参数为最大输出功率 5 kW,波长为 1.07 μm,光束直径为 0.26 mm。通过安装于焊接头中的分光模块将一束光分成两束光而获得双光束光纤激光,其光斑间距 L 为 0.6 mm。焊接过程中采用 Optronis 高速摄像机(型号为 Camrecord 5000×2)实时观察焊接过程中的熔池行为,其数据采集频率为 4000 frame/s。采用 Cavitar 半导体脉冲激光器(型号为 CAVILUX HF)作为辅助光源以照亮焊接区域。焊接过程中采用双光束串行和并行的方式进行焊接,如图 2 所示。焊接过程中采用氩气作为保护气体,具体的焊接工艺参数如表 2 所示。

对于十字交叉型接头,其焊接过程为在未开口板的两侧分别进行一道双光束焊接,如图 3 所示。为使焊缝能够完全熔合插接部位左右两侧的接合面,对焊缝熔宽具有一定的要求。由于每道焊缝会分别熔合左右接合面的上下部分,如图 3 中红色线标示位置,因此焊接过程中要求焊缝上下部分的熔宽都尽可能大,以保证接合面能够完全熔合。此外,为满足十字交叉型接头的应用需求,要求其抗拉强度大于母材强度的 90%。

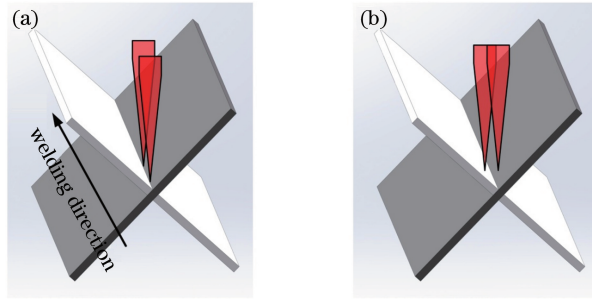


图 2 十字交叉型接头双光束激光焊接光束排布方式。(a) 串行;(b) 并行

Fig. 2 Beam configurations of dual beam laser welding of cross-type joint. (a) Tandem; (b) side-by-side

表 2 十字交叉型接头双光束激光焊接工艺参数

Table 2 Parameters used in dual beam laser welding of cross-type joint

Welding parameter	Value
Laser power P	2~3 kW
Welding speed V_w	1~1.5 m/min
Interbeam spacing L	0.6 mm
Beam configuration	Tandem/side-by-side/single
Shielding gas flow rate	20 L/min

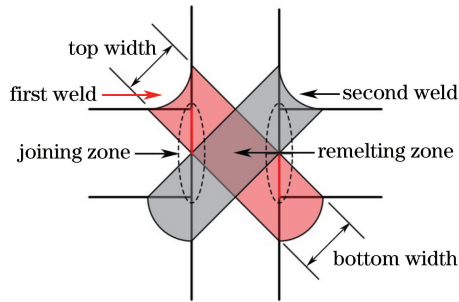


图 3 十字交叉型接头焊缝成形示意图

Fig. 3 Schematic of weld formation of cross-type joint

焊后将焊接接头切割、研磨、抛光后在质量分数为 10% 的三氧化铬溶液中进行电解腐蚀。采用 OLYMPUS 金相显微镜(型号为 GX 71)观察焊缝横截面成形;采用 KEYENCE 超景深光学显微镜(型号为 VHX-1000E)分析焊缝微观组织。采用 HXD-1000TM 数字式显微硬度计进行显微硬度测试,加载载荷 200 g,保持时间为 10 s。采用 INSTRON-5569 电子万能材料试验机测试接头抗拉强度,载荷拉伸速率为 2 mm/min。拉伸试件取样位置及尺寸如图 4 所示。由于十字交叉型接头是由两块板插接而成,两端接合面的位置不同,所以拉伸试样需根据接头接合面的方向分别截取。

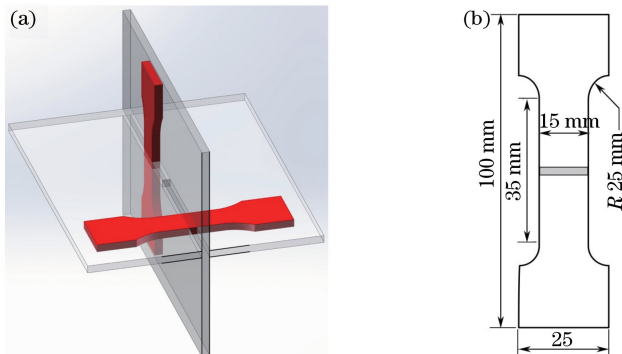


图 4 十字交叉型接头拉伸试件。(a) 取样位置;(b) 试件尺寸

Fig. 4 Tensile specimen of cross-type joint. (a) Sampling position; (b) specimen dimension

3 试验结果与讨论

3.1 焊缝成形

图 5 所示为 $P=2000\text{ W}$, $V_w=1.2\text{ m/min}$ 条件下的单光束激光焊接十字交叉型接头的焊缝成形横截面图。可以发现,由于焊缝熔宽小,在插接处两侧接合面均未完全熔合,不能满足成形要求。在一定范围内通过增大激光功率以及采用散焦光斑也不能使接合面完全熔合。分析原因认为,这是由于光纤激光光斑尺寸较小,其热作用范围也较小,接合面的长度相对其热作用范围来说较大,所以难以完全熔合。因此采用双光束激光焊接的方式对十字交叉型接头进行焊接,拟利用两束激光增大加热面积,以保证接合面的完全熔合。

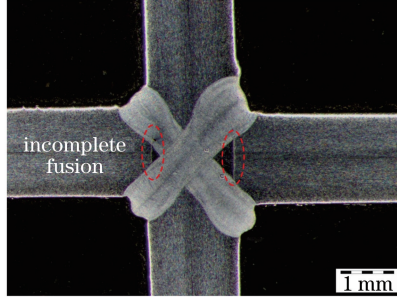


图 5 单光束激光焊缝成形横截面图

Fig. 5 Weld cross-section of single beam laser welding

首先采用高速摄像实时观察了在 $P=3000\text{ W}$, $V_w=1.0\text{ m/min}$ 条件下不同排布方式双光束焊接熔池行为,结果如图 6 所示。可以发现,在光斑间距为 0.6 mm 时,在熔池中形成了两个独立的匙孔。双光束串行排布时,熔池边缘平滑,焊接过程中会有少量飞溅产生。分析原因认为,这是由于熔池表面匙孔间的熔体在匙孔的相互作用下向熔宽方向流动^[12]而撞击到两侧的试板造成的。并行排布时,熔池边缘不规则,这是由于光束直接作用于两侧倾斜的板上,在热源作用下产生向上的不稳定流动,导致侧板不能被稳定熔化。所以,从焊缝表面成形方面,双光束串行排布优于并行排布。

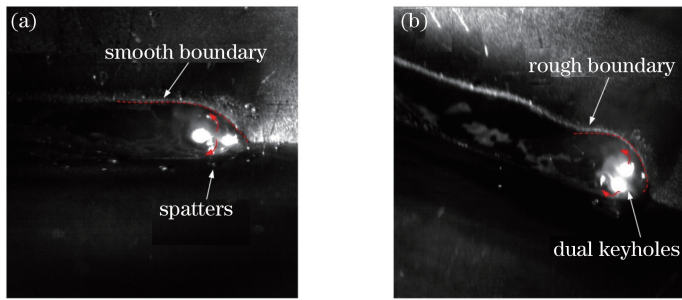


图 6 不同光束排布方式下双光束激光焊接熔池行为。(a) 串行;(b) 并行

Fig. 6 Molten pool behaviors of dual beam laser welding with different beam configurations. (a) Tandem; (b) side-by-side

图 7 所示为双光束串行排布时不同热输入条件下的焊缝成形横截面图。可以发现,与单光束焊缝相比,在相同的热输入条件下焊缝熔宽明显增大,接合面处仅有很小的部分未熔合,如图 7(a)所示。焊缝成形良

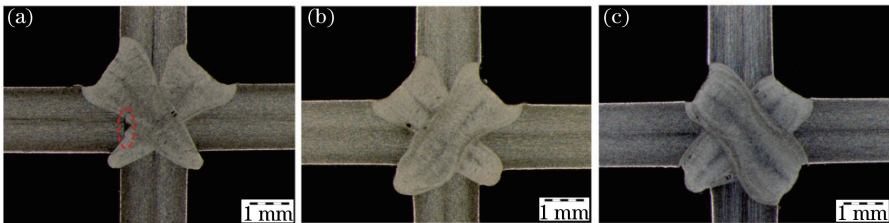


图 7 不同热输入下串行双光束激光焊缝成形横截面图。(a) 100 kJ/m ($P=2000\text{ W}$, $V_w=1.2\text{ m/min}$);
(b) 120 kJ/m ($P=2400\text{ W}$, $V_w=1.2\text{ m/min}$); (c) 138 kJ/m ($P=2300\text{ W}$, $V_w=1.0\text{ m/min}$)

Fig. 7 Weld cross-sections of tandem dual beam laser welding with different heat inputs. (a) 100 kJ/m ($P=2000\text{ W}$, $V_w=1.2\text{ m/min}$); (b) 120 kJ/m ($P=2400\text{ W}$, $V_w=1.2\text{ m/min}$); (c) 138 kJ/m ($P=2300\text{ W}$, $V_w=1.0\text{ m/min}$)

好且形状过渡均匀,焊缝上下部熔宽均较大,在热输入为 120 kJ/m 时即实现结合面完全熔合。

图 8 所示为并行排布时不同热输入下的焊缝成形横截面图。可以发现,焊缝成形不规则,上部熔宽较大,下部熔宽较小,但同样实现了结合面的熔合。分析原因认为,双光束焊接过程中由于光斑间距的存在增大了有效加热面积,使得焊缝熔宽相比单光束焊接明显增大,因此有利于结合面的熔合。

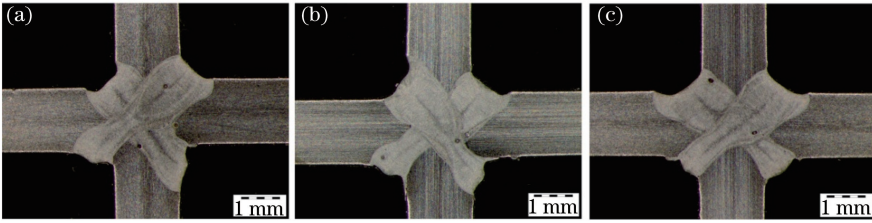


图 8 不同热输入下并行双光束激光焊缝成形横截面图。(a) 120 kJ/m ($P=3000\text{ W}, V_w=1.5\text{ m/min}$); (b) 128 kJ/m ($P=3200\text{ W}, V_w=1.5\text{ m/min}$); (c) 140 kJ/m ($P=2800\text{ W}, V_w=1.2\text{ m/min}$)

Fig. 8 Weld cross-sections of side-by-side dual beam laser welding with different heat inputs.

(a) 120 kJ/m ($P=3000\text{ W}, V_w=1.5\text{ m/min}$); (b) 128 kJ/m ($P=3200\text{ W}, V_w=1.5\text{ m/min}$); (c) 140 kJ/m ($P=2800\text{ W}, V_w=1.2\text{ m/min}$)

焊缝熔宽是影响十字交叉型接头结合面能否熔合的重要因素。因此,对第一道焊缝的正面和背面的最大熔宽(如图 3 所示)进行了分析,结果如图 9 所示。可以发现,串行排布时,随热输入的增大,正面熔宽先减小后增大,背面熔宽持续增大;在热输入为 138 kJ/m 时,正面和背面熔宽相近。并行排布时,随热输入的增大,焊缝正面熔宽增大趋势明显,背面熔宽小且热输入变化对其影响较小,因此二者之间差距急剧扩大。此外,在热输入相同时,串行排布时的熔宽大于并行排布。分析认为,这与双光束不同排布方式下熔池流动以及热传输行为有关。双光束焊接时,由于匙孔间的相互作用会在垂直于光斑连线的方向形成加强的流动^[12]。因此,串行排布时会在熔宽方向形成强烈的流动,在受到两侧板的阻碍后向熔池内部流动,因此更多的热量被传输到熔宽方向和熔池内部,因此此时焊缝正面和中下部熔宽均较大。并行排布时,在熔池长度方向形成加强的流动,传输到熔宽方向以及焊缝中下部的热量少,因此熔宽小于串行排布。

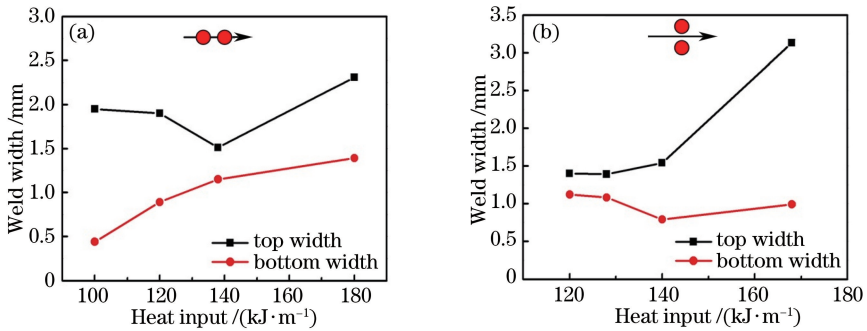


图 9 不同双光束排布方式下第一道焊缝熔宽随热输入变化曲线。(a) 串行;(b) 并行

Fig. 9 Relationship between the first weld width and heat input with different dual beam configurations.

(a) Tandem; (b) side-by-side

3.2 接头性能

3.2.1 力学性能

图 10 所示为不同双光束排布方式下,接头抗拉强度随热输入的变化情况。由图 10(a)可以发现,双光束串行排布时,抗拉强度值随热输入的增大而增大;热输入为 138 kJ/m 时抗拉强度为 598 MPa,达到母材强度(620 MPa)的 96.5%,满足使用要求。图 10(b)所示为并行排布时抗拉强度随热输入的变化情况。可以发现,抗拉强度仍然随热输入的增大而增大;但在相同的热输入条件下,其抗拉强度值明显小于串行排布。在热输入为 120 kJ/m 时,双光束串行排布和并行排布下的抗拉强度分别为 468 MPa(红色箭头指示位置)和 372 MPa,相比减小 20.5%。热输入为 140 kJ/m 时其抗拉强度增大到 559 MPa,为母材强度的 90.2%,也达到使用要求,但仍小于串行排布时的强度值。分析认为,不同排布方式下抗拉强度值的差异与其焊缝成形密

切相关。在接合面完全熔合的条件下,串行排布焊缝上下熔宽相近,而并行排布上部熔宽明显大于下部熔宽,这种成形的不均匀性可能会对接头力学性能造成不利的影响。

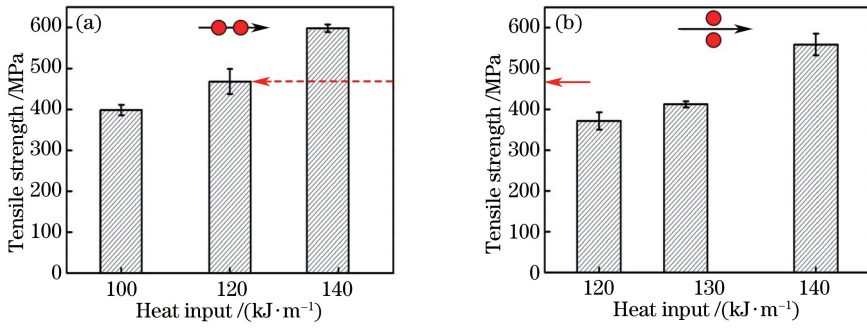


图 10 不同双光束排布方式下接头抗拉强度随热输入变化情况。(a) 串行;(b) 并行

Fig. 10 Relationship between tensile strength of joint and heat input with different dual beam configurations.

(a) Tandem; (b) side-by-side

结合熔池行为、焊缝成形以及抗拉强度的试验结果,可以发现双光束串行排布时焊缝成形和力学性能明显优于并行排布,因此这种排布方式更有利于十字交叉型接头的焊接。

3.2.2 显微硬度

由于对接头采用两道焊,因此,第二道焊缝必然会重熔第一道焊缝的部分区域,如图 3 所示,因此重熔区的组织性能可能会有别于未重熔区。对焊缝重熔前后分别进行显微硬度测定,其硬度值的变化情况如图 11 所示。可以发现,焊缝区硬度高于母材,且焊缝中心区域硬度相对较低;重熔后硬度进一步提高。分析认为,这与焊缝重熔前后的微观组织变化有关。

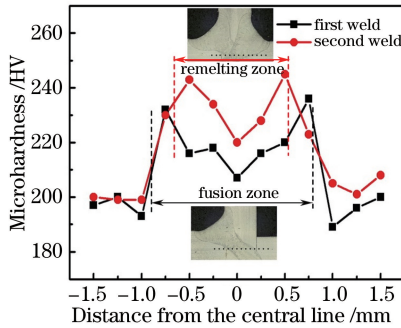


图 11 十字交叉型接头重熔前后显微硬度值

Fig. 11 Microhardness of cross-type joint before and after remelting

图 12 所示为重熔前后焊缝的微观组织。由于 321 不锈钢为奥氏体不锈钢,因此母材组织主要为奥氏体以及晶界残留的少量 δ 铁素体,如图 12(a) 所示。第一道焊后,熔池凝固过程中首先析出 δ 铁素体,然后发生 δ 铁素体转变为奥氏体的固态相变;由于激光焊接过程中焊缝熔合线附近冷却速度很大,一部分 δ 铁素体晶核来不及转变为奥氏体而密集分布于该区域^[13],如图 12(b) 中箭头所示,焊缝中心冷却速度相比熔合线小,因此也有 δ 铁素体保留,这种针状 δ 铁素体密集分布于奥氏体基体中会起到强化作用^[14]从而使得焊缝硬度提高。第二道焊后,重熔区针状 δ 铁素体析出的数量及范围均增大,焊缝中心区域铁素体数量相比第一道焊也增多,如图 12(e) 和 (f) 所示,因此整个重熔区的显微硬度也进一步提高。

4 结 论

采用双光束光纤激光焊接的方法实现了特殊的十字交叉型接头的焊接,获得了成形良好、力学性能满足使用要求的焊接接头。在热输入大于 120 kJ/m 条件下双光束焊接可实现接合面的完全熔合,且串行排布时焊缝成形优于并行排布。串行排布时熔池边缘平滑,随热输入的增大,串行排布时正面和背面熔宽均呈增大趋势;并行排布时熔池边缘不规则,随热输入的增大,正面和背面熔宽差距迅速扩大。接头抗拉强度随热

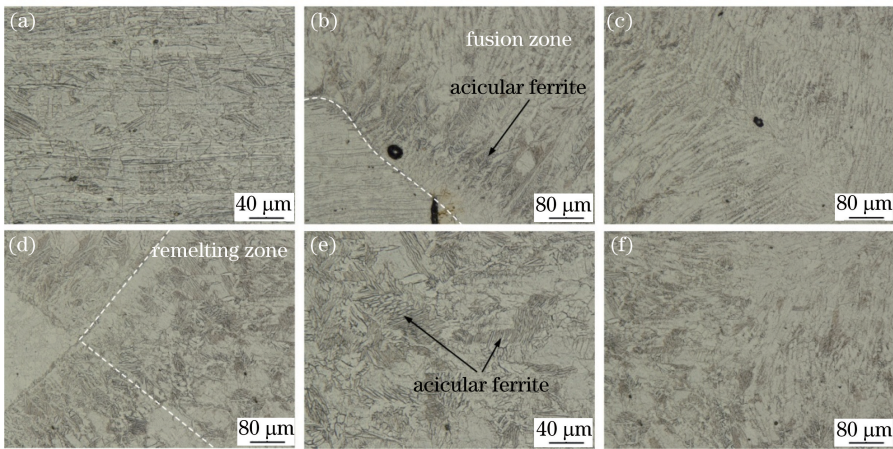


图 12 十字交叉型接头焊缝微观组织。(a) 母材;(b) 第一道焊缝熔合线;(c) 第一道焊缝中心;
(d) 重熔区;(e) 重熔区熔合线;(f) 重熔区中心

Fig. 12 Microstructures of cross-type joint weld. (a) Base metal; (b) fusion line of the first weld; (c) center of the first weld; (d) remelting zone; (e) fusion line of remelting zone; (f) center of remelting zone

输入的增大而增大。在热输入相同条件下,双光束串行排布接头抗拉强度明显大于并行排布,在热输入为 140 kJ/m 时接头强度可达母材的 96.5%,满足使用要求。焊缝显微硬度高于母材,且重熔区显微硬度高于未重熔区。这主要与重熔区存在的针状 δ 铁素体数量和范围增大有关。

参 考 文 献

- [1] Chen Yanbin. Modern laser welding technology[M]. Beijing: Science Press, 2005.
陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, *et al.* Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.
陈根余, 陈 飞, 张 屹, 等. 对接间隙对车用高强钢光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.
- [3] Zhang Fan, Li Fang, Wang Shien, *et al.* Research of lap gap in fiber laser lap welding of galvanized steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003011.
张 帆, 李 芳, 王诗恩, 等. 镀锌钢板搭接光纤激光焊接中搭接间隙的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003011.
- [4] Yang Zhibin, Tao Wang, Liu Shen, *et al.* Study on the characteristics of double-sided laser beam welding for T-joints [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0503007.
杨志斌, 陶 汪, 刘 申, 等. T 型接头双侧激光同步焊接特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0503007.
- [5] Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1783-1788.
李俐群, 陈彦宾, 陶 汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1783-1788.
- [6] Lei Zhenglong, Li Ying, Chen Yanbin, *et al.* Effect of process parameters on porosity formation ratio in dual-beam laser welding of aluminum alloys with filler wire[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 40-44.
雷正龙, 李 颖, 陈彦宾, 等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 40-44.
- [7] Haboudou A, Peyre P, Vannes A B, *et al.* Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 363(1-2): 40-52.
- [8] Longfield N, Lieshout T, De Wit I, *et al.* Improving laser welding efficiency[J]. Welding Journal, 2007, 86(5): 52-54.
- [9] Li Liqun, Zhang Xinge, Dai Jingmin, *et al.* Study on dual beam laser welding of different thickness plates[J]. Applied Laser, 2010, 30(6): 474-478.
李俐群, 张新戈, 戴景民, 等. 不等厚板双光束激光焊接研究[J]. 应用激光, 2010, 30(6): 474-478.
- [10] Yang Jing, Li Xiaoyan, Gong Shuili, *et al.* Joint formation by twin-spot laser welding of 1420 aluminium-lithium alloy

- [] . Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(12): 29-32.
- 杨 璟, 李晓延, 巩水利, 等. 1420 铝锂合金双光点激光焊接头成形[J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 29-32.
- [11] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R. Dual-beam laser welding of AZ31B magnesium alloy in zero-gap lap joint configuration[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56(5): 247-255.
- [12] Hu J L, Tsai H L. Fluid flow and weld pool dynamics in dual-beam laser keyhole welding[C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2003: 151-159.
- [13] Lippold J C. Solidification behavior and cracking susceptibility of pulsed-laser welds in austenitic stainless steels[J]. Welding Journal Including Welding Research Supplement, 1994, 73(6): 129-139.
- [14] Shi Qing, Wang Zhibin, Wang Wenxian, *et al.* Microstructure and properties of dissimilar metal welds of ferritic and austenitic stainless steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(4): 143-148.
- 石 青, 王志斌, 王文先, 等. 铁素体不锈钢/奥氏体不锈钢焊接接头的组织和性能[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(4): 143-148.